บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุ

2.1.1 อลูมิเนียม

ปราโมทย์ พูนนายม และคณะ [6] ได้สรุป ทฤษฎีเกี่ยวกับอลูมิเนียมที่น่าสนใจไว้ดังนี้ อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในโลก [1] และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณหนึ่งในสามส่วนของเหล็กกล้า (7.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในบรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเคมีและระบบเคมีอื่นๆ ผิวอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง อลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรงดึงสูงถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [7]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [2]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660^{o}C
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 MPa
สินแร่	บอกไซด์ (สารมลทินผสมระหว่าง Al2O3 และ $Al(OH)_3$
ธาตุผสม:	Cu, Mg, Mn, Si, Zn
การใช้งาน:	บรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระทะ ชิ้นส่วนโครงสร้างยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

การแบ่งชนิดของอลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม [2] ดังแสดงในตารางที่ 2.2 คือ กลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการรีด และกลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ ในที่นี้ขอกล่าวถึงอลูมิเนียม

กลุ่มที่ผ่านการรีดเท่านั้น โดยที่อลูมิเนียมที่ผ่านการรีดนั้นสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ตัวเลข 4 ตัว ดังรายละเอียดด้านล่าง และตัวอย่างของอลูมิเนียมบางกลุ่มแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [2]

กลุ่ม	บริสุทธิ์	Cu	Mn	Si	Zn	Sn
ผ่านการรีด	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	7XXX	8XXX
ผ่านการหล่อ	1XXX	2XX.X		4XX.X	7XX.X	2XX.X

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอลูมิเนียมผสม [2]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี (%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การยืดตัว
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si			
1100	99.0	-	0.6	-	-	0.3	O	90	40
							H18	165	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	20
							T3	485	18
3034	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	22
							H36	260	7
4043	93.6	0.3	0.8	-	-	5.2	O	130	25
							H18	285	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18
							H38	200	3
6063	98.5	-	0.3	0.7	-	0.4	O	90	25
							T4	172	20

- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ ของอลูมิเนียมที่ 99.0 % ถึง 99.9 % อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสีย คือในด้าน

ของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น(Strain Hardening)

- อลูมิเนียมผสมทองแดง (อนุกรม 2xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำว่าชนิดอื่นๆ คือ จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีการย้ำหมุด

- อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (อนุกรม 3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

- อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ

- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมเหมือนอนุกรม 4xxx นอกจากนั้นยังนำไปทำถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

- อลูมิเนียมแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

- อลูมิเนียมสังกะสี – แมกนีเซียม (อนุกรม 7xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนว

เชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณดังกล่าวได้ เกิดความแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 อักษรห้อยท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต [2]

สัญลักษณ์	**คำอธิบาย**
F	จากการผลิตโดยตรงไม่ผ่านการอบชุบ
H	การแปรรูปเพื่อเพิ่มความแข็ง (Strain hardening)
O	การอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความแข็งจากการแปรรูป และเพิ่มความเหนียวเนื่องจากแรงดึง
T	การอบคืนไฟ (Tempering)
W	การอบบ่ม (Age hardening)

นอกจากสัญลักษณ์ตัวเลข 4 ตัวแล้ว อลูมิเนียมมักมีสัญลักษณ์กรรมวิธีทางความร้อนห้อยท้ายด้วยตัวอักษรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นการการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสม โดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และได้กำหนดสัญลักษณ์อักษรตามหลัง เพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากกระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้น ๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non – Heat Treatable คือกลุ่ม 1xxx 3xxx และกลุ่ม 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษ และอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค และรหัสของกระบวนการทางความร้อน ได้ถูกกำหนดโดยสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐฯตั้งแต่ปี 1948 เป็นตัวอักษร 4 ตัว ตามด้วยตัวเลขอีกหนึ่งหรือสองตัว เพื่อบอกถึงความแตกต่างในสาระสำคัญของแต่ละกรรมวิธีได้แก่

- F หมายถึง สภาพโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางกล

- O หมายถึง สภาพของโลหะภายหลังการอบอ่อนซึ่งโลหะจะเกิดผนึกใหม่ เป็นภาวะที่โลหะจะอ่อนและเหนียวที่สุดในบรรดาอลูมิเนียมรีดทั้งหลาย

- H1 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นอย่างเดียว

- H2 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นและอบอ่อนให้เหนียวขึ้นเล็กน้อย

- H3 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นแล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก

- T1 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนแล้วปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติ

- T2 หมายถึง โลหะผ่านการอบอ่อนมาแล้ว แล้วใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปมาเท่านั้น

- T3 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Heat Treatment) แล้วแปรรูปเย็นทันที่เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล

- T4 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย และปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติจนอยู่ในสภาพคงรูป

- T5 หมายถึง โลหะที่ผ่านการอบละลายบางส่วนและทำให้แข็งตัวแบบเทียม (Artificial aging)

- T6 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายมาก่อนแล้ว นำไปทำให้เย็นตัวด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

- T7 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายแล้วปรับให้คงสภาพโดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลา เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดเกรนให้มีขนาดที่ทำให้โครงสร้างภายในมีเสถียรภาพ

- T8 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลาย ผ่านการแปรรูปเย็นและทำให้แข็งตัวแบบเทียม

- T9 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายทำให้แข็งตัวแบบเทียมด้วยกระบวนการทางความร้อน แล้วจึงนำไปแปรรูปเย็น

- T10 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนทำนองเดียวกับ T5 นำไปผ่านการแปรรูปเย็นก่อนทำให้แข็งตัวแบบเทียม

อย่างไรก็ตามการใช้งานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างจำกัด ส่วนมากมักใช้กับงานที่ต้องการความ สามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ขนถ่ายและจัดเก็บสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปในอลูมิเนียมและทำให้เกิดอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนั้นสัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรห้อยท้ายต่อจากตัวเลข 4 ตัวที่เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบถึงรายละเอียดของการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.3

นอกจากนั้นแล้ว www.azom.com [8] ได้สรุปข้อมูลที่น่าสนใจไว้ว่า อลูมิเนียม 6063 เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมกลุ่มอื่นๆ มีผิวค่อนข้างเรียบ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ง่ายต่อการเชื่อม ทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการอโนไดซ์ (Anodizing) ได้ง่าย ส่วนมากมักถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตที่ดึงขึ้นรูป ขอบหน้าต่าง ประตู หรือท่อต่างๆ ส่วนผสม

ทางเคมีโดยทั่วไปของอลูมิเนียมเกรดนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 2.6 และสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมเกรด 6063 [8]

ธาตุ (%wt)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
6063	0.20-0.60	0.35 max	0.10 max	0.10 max	0.45-0.90	0.10 max	0.10 max	0.10 max	สมดุล

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรด 6063 [8]

สมบัติ	O	T4	T6
ความเค้นพิสูจน์ต่ำสุด (MPa)	50	65	160
ความเค้นแรงดึงต่ำสุด (MPa)	100	130	195
ความแข็งแรงเฉือน (MPa)	70	110	150
ความสามารถในการยืดตัว (%)	27	21	14
ความแข็ง (Hv)	25	50	80

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมเกรด 6063 [8]

สมบัติ	ค่าที่แสดง
ความหนาแน่น	2.70 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	600 ^{o}C
ความต้านทานไฟฟ้า	0.035 × 10^{-6} O.m
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	200 W/m.K
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	23.5 × 10^{-6} /K

2.2.2 เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 [7]

เหล็กกล้า SKD 11 หรือเทียบเท่าเหล็ก AISI D2 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าทำเครื่องมือชนิดคาร์บอนสูง โครเมียมสูง (12% โครเมียม) และเหล็กกล้าสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์เย็น ที่คงรูปร่างเดิมได้ดีหลังจากการชุบแข็ง เป็นเหล็กที่เหมาะสำหรับการชุบด้วยอากาศ และมีควาเหนียวดีมาก ลักษณะเด่นของเหล็กกล้า SKD 11 มีความทนทานต่อการสึกหรอดี และรักษาคมตัดได้ดีเยี่ยม รวมทั้งคมเหนียว แน่นสูงความแข็งสูงมากเมื่อผ่านการชุบแข็ง ชุบแข็งง่าย สามารถชุบไนไตรดิ่งได้ ทนต่อการเสียด

สีได้ดีเยี่ยมและมี ความเหนียวแกร่งพอสมควร คุณภาพสูง ทนทานการเสียดสีสูง โดยรวมแล้วเหล็กกล้า SKD 11 จะประกอบด้วยส่วนผสมหลัก โดยประมาณ คือ C 1.5% , Cr 12% , Mo 0.9-1% , V 0.8-1% และสัดส่วนธาตุอื่นๆ ที่เป็นธาตุผสมรอง คือ Mn 0.4% ,Si 0.4-0.5%

2.2.3 เหล็กกล้าเครื่องมือ SKH57 [9]

เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือในกลุ่มของเหล็กกล้าเครื่องมือใช้งานที่รอบสูง (High speed steel) ซึ่งอยู่ในกลุ่มเดียวกับเหล็กกล้า SKD11 มีคุณลักษณะเด่น คือ มีความแข็งสูง สามารถคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดี คงความแข็งได้เมื่อทำการอบให้ความร้อนสูงเกินไป (Overheat) เมื่อทำการชุบแข็งสามารถทำการอบชุบได้หลายๆ แบบ ความสามารถในการแปรรูปด้วยหินเจียระไนดี เพิ่มความแข็งได้จากการออกซิไดซ์ (Oxidixing) หรือเดคาบูไรซ์ (Decarburizing) การใช้งานส่วนมากใช้ทำเครื่องมือตัด แม่พิมพ์ขึ้นรูปเย็นต่างๆ ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าชนิดนี้แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า SKH57

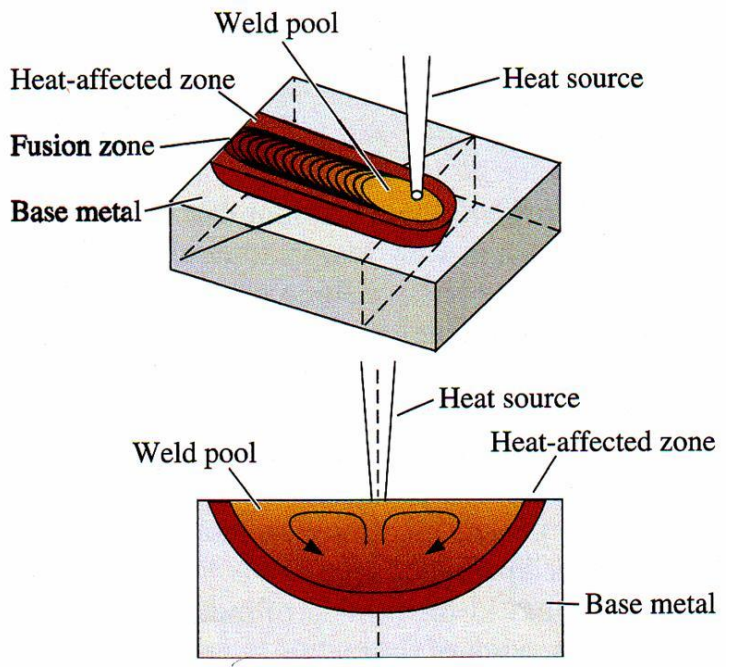
ธาตุ (wt%)	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	S	P
SKH57	0.70 /0.80	$\leq$ 0.40	$\leq$ 0.40	3.80 /4.40	17.5 /19.00	$\leq$ 0.30	1.00 /1.40	$\leq$ 0.03	$\leq$ 0.03

2.2 การเชื่อมโลหะ

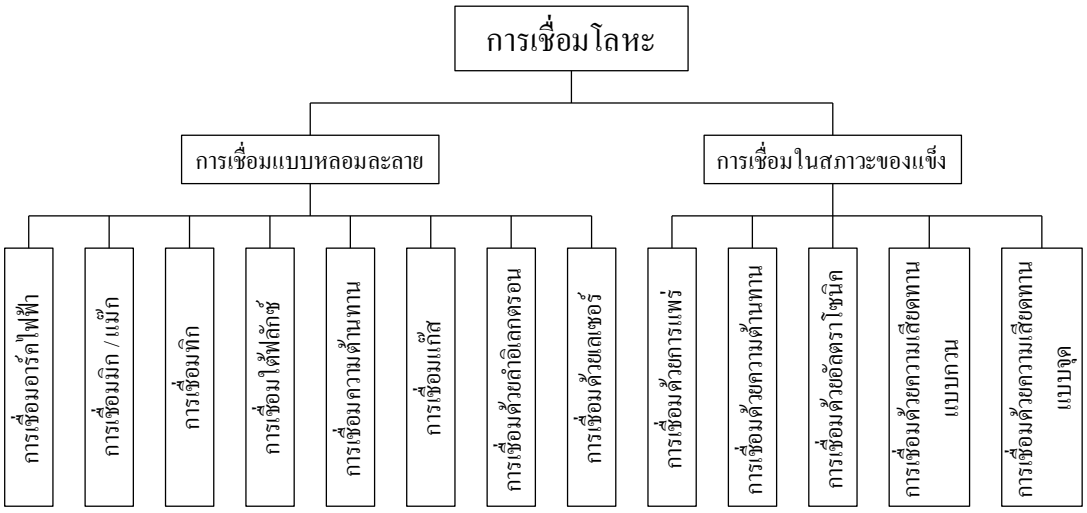
2.2.1 นิยามการเชื่อมโลหะ

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [10] สรุปความรู้เบื้องต้นของการเชื่อมโลหะไว้อย่างน่าสนใจดังนี้ การเชื่อมโลหะ คือ การต่อชิ้นโลหะเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนในการหลอมละลายรอยต่อระหว่างโลหะสองชิ้นให้หลอมละลายเข้าด้วยกันและเปลี่ยนเป็นโลหะชิ้นเดียวกัน ขณะที่โลหะที่บริเวณรอยต่อเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันนั้น อาจเติมโลหะผสมบางตัวในลักษณะที่เรียกว่าลวดเชื่อม (Filler metal) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางตัวในแนวเชื่อมให้ดีขึ้น ตัวอย่างการเชื่อมโลหะอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2.1 ความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน (Heat source) ถูกส่งผ่านไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะสองแผ่น (Base metal) ทำให้เกิดการหลอมละลายรวมกันที่บริเวณบ่อเชื่อม (Weld pool) และเมื่อเคลื่อนที่แหล่งให้ความร้อนไปตามแนวรอยต่อ จะทำให้เกิดแนวเชื่อมขึ้น โดยบริเวณบ่อเชื่อมหรือพื้นที่หลอมละลาย (Fusion zone) นี้ จะก่อให้เกิดการแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างแตกต่างจากโลหะหลัก (Base metal) ในการเชื่อมพื้นที่สำคัญอีกพื้นที่ๆ มีความสำคัญ คือ พื้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) พื้นที่นี้อยู่ถัดออกไปจากพื้นที่การหลอมละลาย

เป็นพื้นที่ๆ ไม่มีการหลอมละลาย แต่ความร้อนที่เกิดจากพื้นที่หลอมละลายทำให้โครงสร้างบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงไป



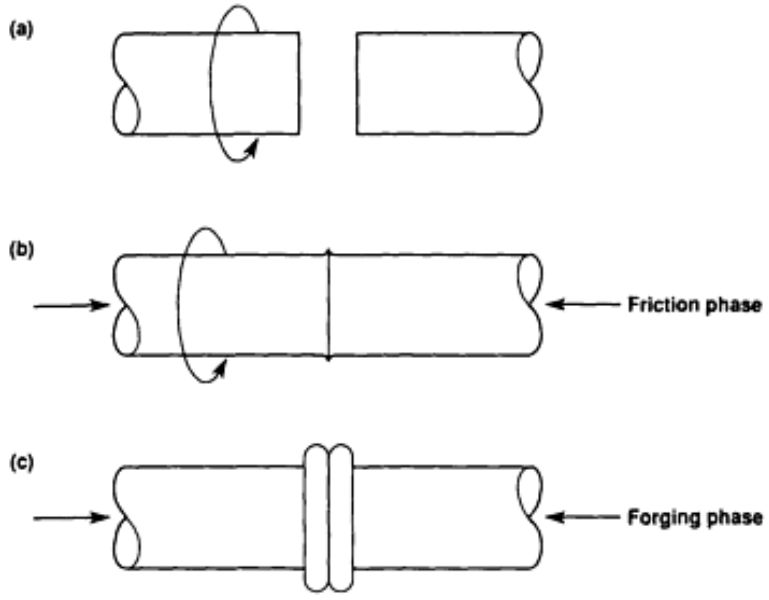
รูปที่ 2.1 หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ [11]



รูปที่ 2.2 รูปแบบของกระบวนการเชื่อม [10]

นอกจากนั้น กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ [10] ได้กล่าวไว้ว่า เทคโนโลยีการเชื่อมในปัจจุบันได้แบ่งการเชื่อมเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 1.2 คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) การเชื่อมแบบหลอมลาย หรือบางครั้งเรียกว่า การเชื่อมหลอมละลายแบบดั้งเดิม (Conventional fusion welding) ความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลายนี้มีลักษณะเดียวกันดังอธิบายในรูปที่ 2.1 การเชื่อมหลอมละลายสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ขณะที่การเชื่อมในสภาวะของแข็ง คือ การเชื่อมในสภาวะที่โลหะหลักไม่เกิดการหลอมละลายแต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากแรงทางกล ทำให้โลหะเกิดการเชื่อมประสานกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้กล่าวถึงการเชื่อมในสภาวะของแข็งเป็นหลัก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขอกล่าวถึงเฉพาะทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมในสภาวะของแข็งเท่านั้น

ปราโมทย์ พูนนายม และคณะ [6] ได้กล่าวไว้ว่า การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid Solution Welding) คือ การเชื่อมต่อวัสดุสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยโลหะบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชิ้นไม่เกิดการหลอมละลาย หรืออุณหภูมิของรอยต่อมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ทำการเชื่อม ส่วนมากรอยต่อของวัสดุเกิดการเชื่อมยึดกันได้ด้วยแรงทางกลหรือความเสียดทาน ตัวอย่างของการเชื่อมในสภาวะของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยกระบวนการเชื่อมที่แสดงเรียกว่า การเชื่อมด้วยการเสียดทาน (Friction Welding) มีขั้นตอนการเชื่อม คือ วัสดุทรงกระบอกตัวที่หนึ่งหมุนด้วยความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a) กดเข้าหาวัสดุทรงกระบอกตัวที่สองที่ถูกยึดแน่นอยู่กับที่ไม่มีการหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b) ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้วัสดุบริเวณรอยต่อเกิดการอ่อนตัว ขณะเดียวกันแรงกดในแนวแกนยาวของแท่งทรงกระบอก จะอัดชิ้นงานเข้าด้วยกันทำให้เกิดการเชื่อมยึดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.3 การเชื่อมด้วยการเสียดทาน [12]

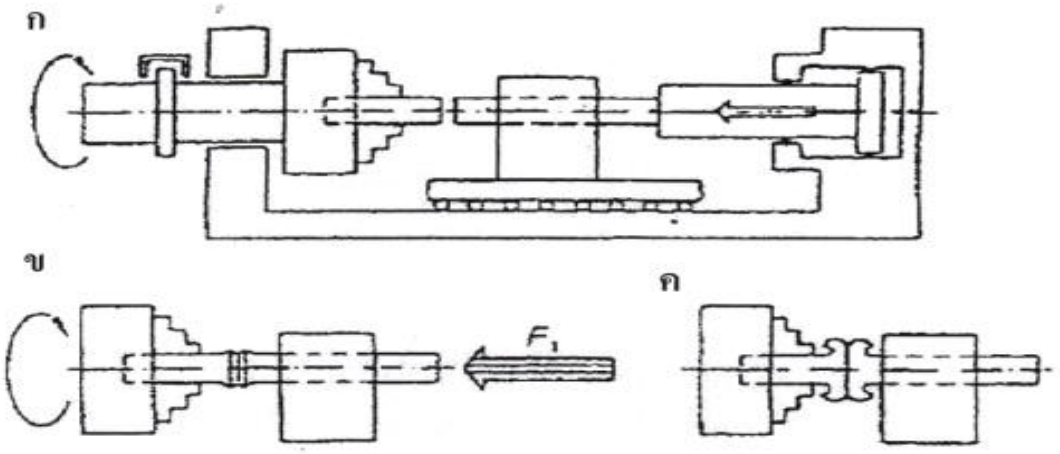
รูปแบบของการเชื่อมในสภาวะของแข็งประกอบไปด้วยการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยการแพร่ (Diffusion welding) การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิค (Ultrasonic welding) การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด (Friction spot joining) หรือการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นต้น เดิมทีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีวิธีการเชื่อมอยู่ 3 วิธีด้วย แต่เนื่องจากได้มีการวิจัยและพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน จึงสามารถแบ่งการเชื่อมด้วยการเสียดทานออกเป็น 4 วิธี คือ

ก. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบธรรมดา (Conventional Friction Welding) เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน โดยให้โลหะชิ้นงานชิ้นหนึ่ง และอีกชิ้นหนึ่งยึดอยู่กับที่ หลังจากเวลาผ่านไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วให้แรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งชิ้นงานหลอมติดกันและจะหยุดหมุนทันทีแสดงดังรูปที่ 2.4

ข. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบแรงเฉื่อย (Inertia Welding) ชิ้นงานมีสองส่วน คือ ส่วนที่หมุน และส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่หมุนจะถูกยึดอยู่ในอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อม ซึ่งมีคอลเลค-ชัค (Collect-chuck) และล้อช่วยแรง (Flywheel) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ ที่ความเร็วหนึ่งจากนั้นจึงหยุดให้พลังงานที่ไปหมุนล้อช่วยแรง แต่ล้อช่วยแรงยังหมุนด้วยตัวเองอยู่ เนื่องจากแรงเฉื่อยในช่วงเวลาที่ล้อช่วยแรงหมุนด้วยตัวเองนี้ เมื่อนำชิ้นงานที่จับยึดอยู่กับที่มาสัมผัสกับชิ้นงานส่วนที่หมุนภายใต้แรงกดคงที่ พลังงานที่เกิดจากล้อช่วยแรงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานจะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน

ค. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบล้อช่วยแรง (Flywheel Friction Welding) เป็นการรวมการเชื่อมแบบธรรมดาและแบบแรงเฉื่อยเข้าด้วยกัน โดยล้อช่วยแรงจะต่ออยู่กับมอเตอร์ขับเพื่อใช้ถ่ายกำลังไปยังเพลาหมุน (Spindle) และตัวคัปเปิ้ล (Couple) ซึ่งต่อรวมอยู่กับคลัทช์ (Clutch) ระบบของมอเตอร์ที่ใช้ขับล้อช่วยแรงจะหมุนอยู่ตลอดเวลา ชิ้นงานส่วนที่หมุนจะต่ออยู่กับคัปเปิลและอีกชิ้นหนึ่งอยู่กับที่หลังจากได้ความเร็วรอบของชิ้นส่วนที่หมุนตามที่ต้องการแล้วจึงให้แรงอัดชิ้นงานส่วนที่อยู่กับที่กับส่วนที่หมุน โดยเพิ่มแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อชิ้นงานติดกันก็จะหยุดหมุนทันที

ง. กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ดีในสภาวะของแข็ง คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ (The welding institute : TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย



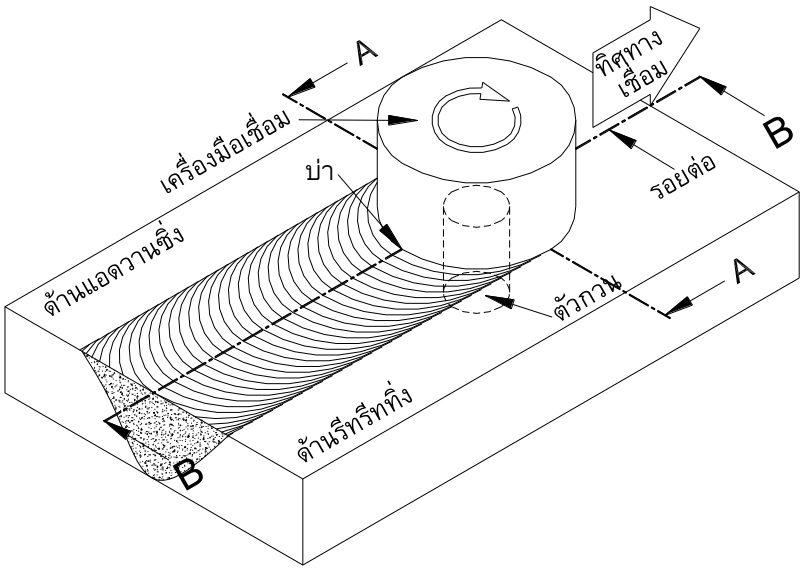
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเชื่อมแบบเสียดทานทั่วไป (ก) ชิ้นงานด้านซ้ายหมุนด้วยความเร็วรอบ (n) และชิ้นงานด้านขวาถูกเลื่อนเข้าด้วยแรงจากไฮดรอลิก ; (ข) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดด้วยแรง (F_1) จนชิ้นงานหลอมละลาย ; (ค) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดจนติดกันอย่างสมบูรณ์กับชิ้นงานด้านซ้าย ชิ้นงานเชื่อมจะหยุดหมุนทันที [12]

2.2.2 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [13]

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [13] ได้รายงานไว้ว่า การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน มีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น หลักการในการเชื่อม คือ ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วสูง สอดเข้าไปในแนวต่อชนของแผ่นวัสดุ 2 แผ่นและทำให้เกิดความร้อนเสียดทานใต้บ่าเครื่องมือและทำให้วัสดุอ่อนตัวลง วัสดุที่อ่อนตัวจะถูกดันให้เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน และเมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่บ่าเครื่องมือเชื่อมจะกดและอัดวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุเป็นแนวเชื่อม และสามารถประยุกต์ใช้การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม และวัสดุต่างชนิดด้วย

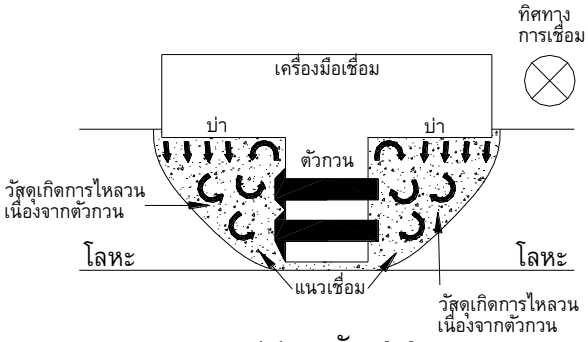
ก. บทนำ

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [3] การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิผลในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร [4] และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงในรูปที่ 2.5

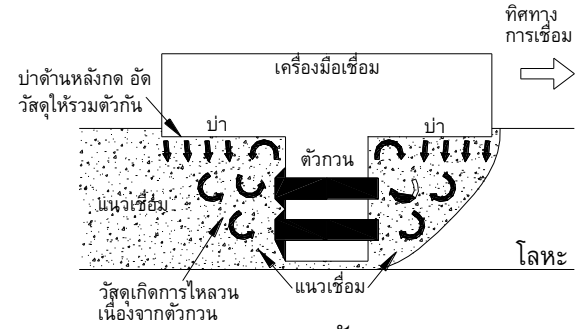


รูปที่ 2.5 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [13]

ตัวกวนที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อมสอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่าของเครื่องมือ เชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงภาคตัด A-A และ B-B ในรูปที่ 2.5 วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่สู่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดย้อนลงมาเนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้น ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction Stir Welding” อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายในบทความนี้เป็นเบื้องต้น ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทรีทติ่ง และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 (ด้านรีทรีทติ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซิ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกด อัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 (ข)



(ก) ภาคตัด A-A



(ข) ภาคตัด B-B

รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดแนวเชื่อมแสดงภาคตัดในรูปที่ 2.5

ข. ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการ

1) ข้อดี

- เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งของการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อลูมิเนียม จะหมดไป นอกจากนั้นผิวออกไซด์หนาที่เคลือบอยู่บนผิวของอลูมิเนียมจะถูกทำให้แตกออกด้วยการขัดหมุนของตัวกวนและกระจายไปทั่วทั้งแนวเชื่อม และลดปัญหาการเสื่อมสภาพของแนวเชื่อมลง แนวเชื่อมที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแนวเชื่อมที่สมบรูณ์ไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น
- กระบวนการเชื่อมราคาไม่แพง สามารถใช้เครื่องกัดในการเชื่อมได้
- ผิวหน้าแนวเชื่อมคุณภาพดีเยี่ยม
- ใช้พลังงานน้อย
- เชื่อมวัสดุหนาสูงสุด 12 มม. [14]
- ความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength) ดีเยี่ยม

2) ข้อเสีย

- ต้องจับยึดชิ้นงานให้แน่นเสมอเพราะแรงที่เกิดขึ้นมีค่าสูง

- ผลจากการเชื่อมทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้สมบัติเดิมตลอดชิ้นงาน
- มีจุดบกพร่องที่มักเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม ที่เกิดจากการถอดตัวกวนออกจากแนวเชื่อม
- เหมาะสมกับการเชื่อมท่าราบ ชิ้นงานแบนยาว
- ช่องว่างระหว่างแผ่นมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10% ของความหนาแผ่นชิ้นงาน [14]

ค. ตัวแปรการเชื่อม

1) ความเร็วรอบ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และมุมเอียงของตัวกวน

ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุบริเวณแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่แตกต่างทำให้เกิดการกวนและการผสมของวัสดุในแนวเชื่อมที่แตกต่าง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุจากด้านหน้าของตัวกวนไปสู่ด้านหลังและทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบรูณ์ที่แตกต่างกัน ความเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงในแนวเชื่อม ความเอียงของตัวกวนที่ทำมุมกับแกนตั้งฉากของเครื่องกัดที่มีค่าเหมาะสมทำให้บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมกดและกวนวัสดุรอบๆ ตัวกวนให้มีการผสมรวมกันได้มากขึ้น

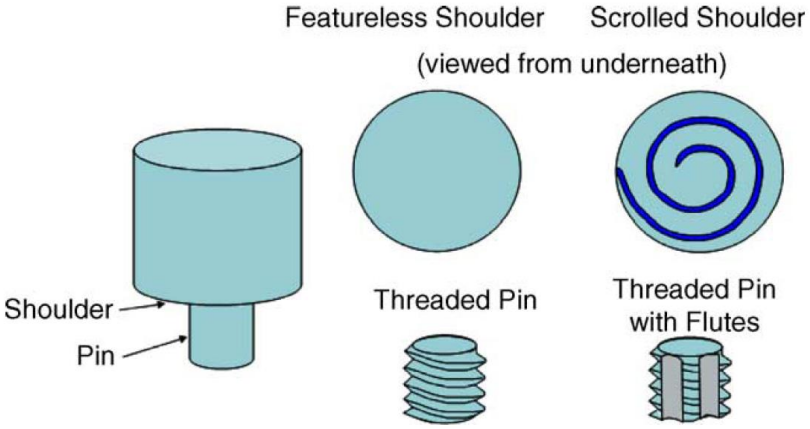
ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าตัวแปรการเชื่อมเหล่านี้ เช่น การศึกษาอิทธิพลของความเร็วเดินแนวเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อชนอลูมิเนียม A356 ที่แสดงการเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงเมื่อความเร็วในการเดินแนวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตกผลึกของซิลิกอนยูเตคติคในแนวเชื่อมอลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งและแข็งแรงเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิ เนียมที่ใช้เป็นวัสดุในการเชื่อม 20% [5] หรือแนวเชื่อมอลูมิเนียม 5083 ที่แสดงค่าความเค้นในแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่แตกต่างในแนวเชื่อมและเวลาในการผ่อนคลายความเครียดในแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลงไป [15] อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วเดินแนวในการเชื่อมอลูมิเนียมกลุ่ม Al-Mg เกรด 6082 ไม่ส่งผลต่อความล้าตัวของแนวเชื่อม [16] และหากพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 2017-T351 ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น [17]

2) รูปร่างของเครื่องมือเชื่อม

เครื่องมือเชื่อมประกอบด้วยรูปร่างสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ บ่าเครื่องมือและตัวกวน โดยหน้าที่หลักของเครื่องมือเชื่อม คือ การทำให้เกิดความร้อน และการทำการรวมผสมวัสดุ

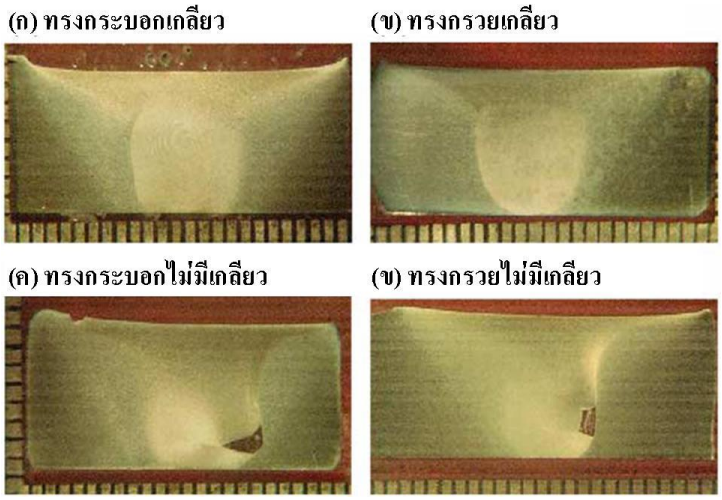
รอบรอยต่อเข้าด้วยกัน ปัจจุบันมีการทดลองใช้เครื่องมือเชื่อมหลายรูปแบบเพื่อทำการเชื่อมอลูมิเนียม เช่น การใช้ตัวกวนเกลียววนขวาเชื่อมอลูมิเนียม 2024 และ 6061 รวมตัวได้ดี ทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น [18]

การใช้ตัวกวนรูปร่างปริซึมสี่เหลี่ยมจตุรัส เกลียววนขวา และเกลียววนซ้าย ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม 1018 และแสดงการรวมตัวของวัสดุดีที่สุดในการใช้ตัวกวนเกลียววนขวา [19] หรือการเปรียบเทียบการใช้ตัวกวนทรงกระบอกเกลียววนขวา และทรงกรวยเกลียววนขวาดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 2014 ที่แสดงค่าแข็งแรงสูงสุดประมาณร้อยละ 75 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียม ซึ่งได้จากตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา นอกจากนั้นตัวกวนทรงเกลียวทำให้ได้แนวเชื่อมที่สมบรูณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) และ (ข) ขณะที่จุดบก พร่องสามารถตรวจพบในตัวกวนที่ไม่มีเกลียวดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และ (ง) นอกจากนั้นตัวกวนทรงกรวยเกลียววนขวาทำให้ขนาดของเม็ดเกรนเล็กและละเอียดขึ้นที่สุด และส่งผลทำให้ค่าความแข็งสูงสุดด้วย [20]



รูปที่ 2.7 เครื่องมือเชื่อม FSW [14]

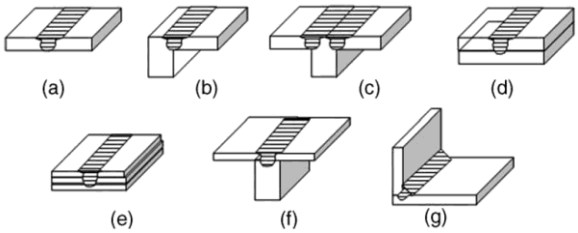
รูปที่ 2.8 เครื่องมือเชื่อมที่ออกแบบสำหรับรอยต่อชนอลูมิเนียม 2014 [20]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อม: [20]

3) รอยต่อ

ในปัจจุบันรอยต่อ FSW ที่มีการใช้งานอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.10 ประกอบไปด้วย รอยต่อชนแผ่นวัสดุสองแผ่นที่ความหนาเท่ากัน รอยต่อมุม รอยต่อตัวที รอยต่อเกย รอยต่อมุมฉาก เป็นต้น



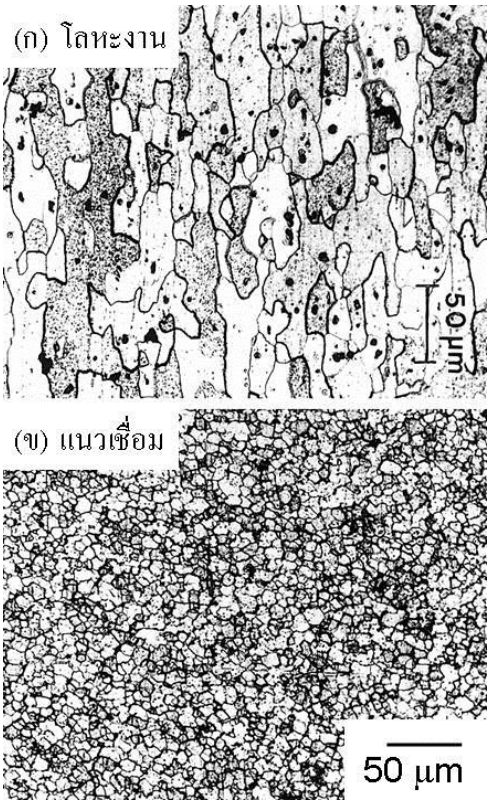
รูปที่ 2.10 รูปแบบรอยต่อการเชื่อม FSW [14]

ง. การเชื่อมอลูมิเนียมผสม

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย เนื่องจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่ามากกว่าเหล็กถึง 6 เท่า ทำให้ความร้อนที่ให้กับอลูมิเนียมเกิดการถ่ายเทออกจากรอยต่ออย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นออก ไซด์ที่เกิดบนผิวของอลูมิเนียม เป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้แนวเชื่อมมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากออกไซด์ของอลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวสูง ($2040^{\circ}C$) กว่าอลูมิเนียมถึง 3 เท่า เมื่อทำการเชื่อม หากไม่สามารถกำจัดออกไซด์บนผิวชิ้นงานออกให้หมดได้จะส่งผลทำให้การควบคุมบ่อหลอมละลายเป็นไปด้วยความยากลำบาก และเกิดการรวมตัวกับโลหะเชื่อมเกิดเป็นจุดบกพร่องต่างๆ เช่น รูพรุน ได้ [21]

จากหลักการการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ที่กล่าวในข้างต้น ปัญหาที่เกิดจากผลความ

แตกต่างของอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ที่ส่งผลทำให้เกิดความยากลำบากในการควบคุมบ่อหลอมละลาย หรือการรวมตัวระหว่างออกไซด์กับโลหะเชื่อม สามารถถูกกำจัดออกไปได้ เนื่องจากการเชื่อมนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายของอลูมิเนียม และการเกิดการเชื่อมยึดกันระหว่างวัสดุเกิดจากการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุที่ถูกกระทำด้วยแรงทางกลเท่านั้น



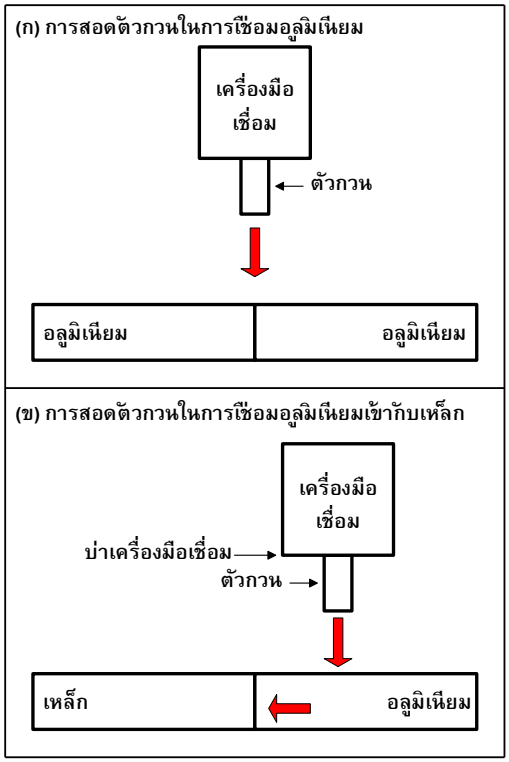
รูปที่ 2.11 (ก) โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมแผ่นรีด 2024 และ (ข) โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของอลูมิเนียม 2024 [15]

เนื่องจากการปฏิบัติการภายใต้จุดหลอมละลายของอลูมิเนียม ทำให้โครงสร้างที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็ง คือ โครงสร้างเดนไดรท์ (Dendrite structure) ที่เกิดขึ้นในโลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมหลอม ละลายซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูงไม่เกิดขึ้น แต่ทำให้เกิดโครงสร้างเกรนที่กลมและเล็กละเอียดมากขึ้น ส่ง ผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหลักที่มีรูปร่างเรียวยาวดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) เกรนในโลหะเชื่อมมีความกลมมนและเล็กละเอียดมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)

ที่ผ่านมา อลูมิเนียมส่วนใหญ่ได้ถูกทดลองทำการเชื่อมด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบ

กวน และเป็นที่ยอมรับว่าสามารถทำให้ได้ค่าความแข็งแรงเทียบเท่าหรือสูงกว่าอลูมิเนียมที่เป็นโลหะหลักที่ใช้ในการเชื่อม [17] ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกสำคัญในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมต่อไป

จ. การเชื่อมวัสดุต่างชนิด



รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อชนของการเชื่อมวัสดุเดียวกันและต่างกัน

ในอุตสาหกรรมรถยนต์ปัจจุบันได้นำเอาอลูมิเนียมเข้ามาใช้แทนที่เหล็ก เพื่อลดน้ำหนักโครงสร้างของรถยนต์ [22] แต่การต่อเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กเข้าด้วยกันเป็นวิธีที่ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากโลหะทั้งสองมีสมบัติทางกล กายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ ขึ้น

ในปัจจุบัน ปัญหาเหล่านี้ลดลง เนื่องจากการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมรอยต่อได้ผลเป็นที่ยอมรับได้ เช่น รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม 5083 และเหล็กกล้า SS400 [23] หรือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม Al6061 และเหล็กกล้า AISI1018 [24] หรือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม 6013-T4 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [25] ซึ่งรอยต่อเหล่านี้แสดงความแข็งแรงดึงสูงกว่าร้อยละ 70 เมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมที่ใช้เชื่อม

อย่างไรก็ตามในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กมีเทคนิคสำคัญที่ควรระมัดระวัง คือ เทคนิคการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อ ในการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อของอลูมิเนียมผสม แนวเส้นผ่าน

ศูนย์กลางและแนวของรอยต่อจะอยู่ที่แนวเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) แต่ในกรณีของรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กไม่สามารถสอดเข้าโดยตรงดังเช่นอลูมิเนียม เนื่องจากความแข็งของวัสดุที่ต่างกันจะทำให้เกิดการเลื่อนไถลของตัวกวนออกจากแนวรอยต่อชน และเกิดการแตกหักได้ ดังนั้นเทคนิคการสอดตัวกวนในการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) ควรนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งมีขั้นตอน คือ ตัวกวนถูกสอดเข้าสู่ด้านอลูมิเนียมจนกระทั่งบ่าเครื่องมือเชื่อมจมลงไปสู่ผิวหน้าของอลูมิเนียมจากนั้นจึงเคลื่อนตัวกวนเข้าหาผิวด้านข้างของเหล็กเพื่อทำให้ได้รอยเชื่อมตามต้องการ [17]

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เป็นทางเลือกในการเชื่อมโลหะที่ยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย หากเลือกตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อ จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีสมบัติทางกล เคมี และกายภาพเท่า กับหรือดีกว่าโลหะที่ใช้เชื่อม นอกจากนั้นยังเป็นกระบวน การที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และประหยัดพลังงาน เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมของประเทศต่อไป

2.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุ [6]

2.3.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง

การทดสอบโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุด ในวิธีของการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลด้านพื้นฐานพอสมควร เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบวิธีการทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยชิ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกดึงด้วยแรงที่กำหนดทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปจนกระทั่งพังทลาย ในการทดสอบแรงดึงอ้างอิงตามรูปที่ 2.13 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในสมการที่ 2.1 ถึง 2.6 ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \tag{2.2}$$

$$\%elongation = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \tag{2.3}$$

$$\%R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \tag{2.4}$$

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \tag{2.5}$$

เมื่อ σ_t = ความเค้น

F_t = แรงกระทำ

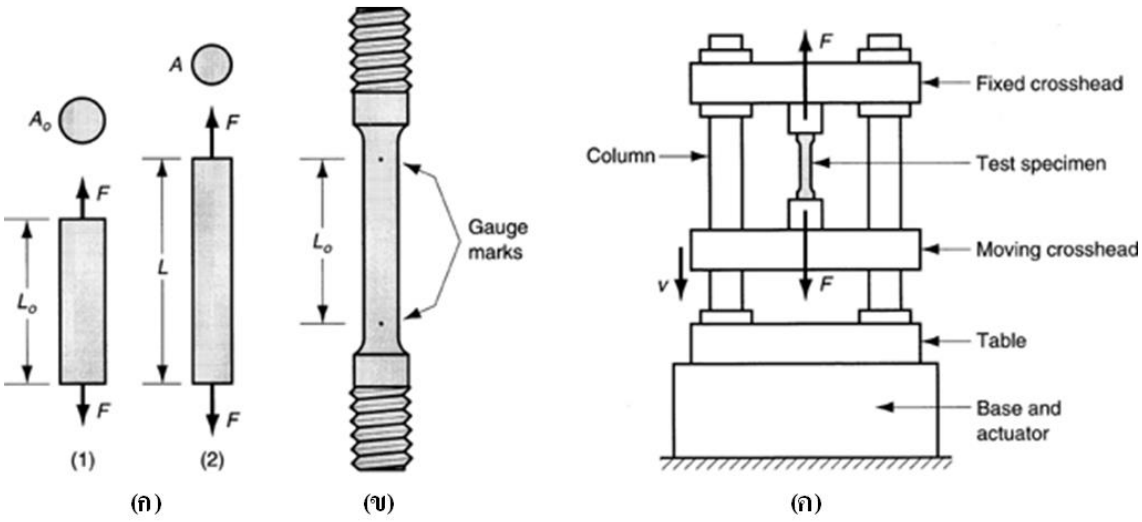
e_t = ความเครียด

L = ความยาวสุดท้าย

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

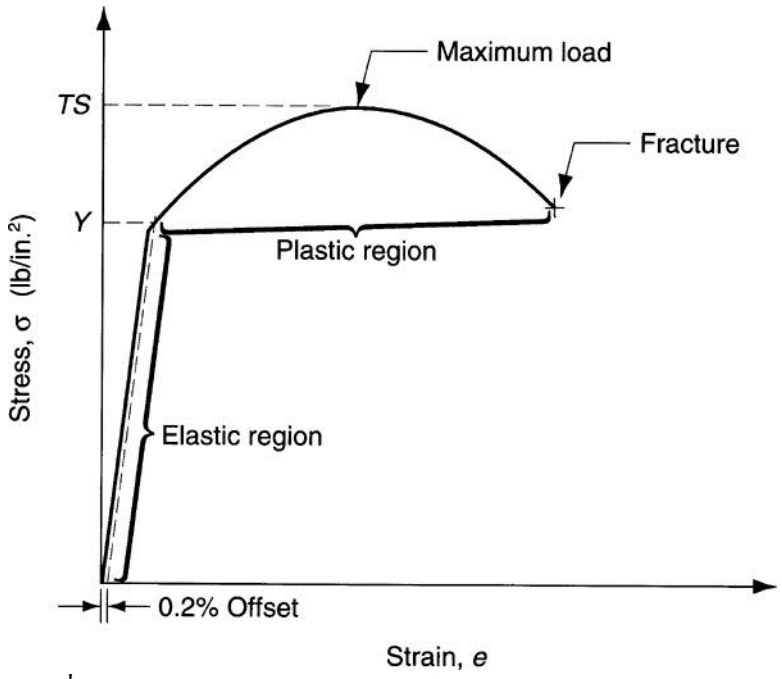
A = พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น



รูปที่ 2.13 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [2]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล๊อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและค่าความเครียดในแกนนอนดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด [2]

ตารางที่ 2.9 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [2]

โลหะ	**โมดูลัสการยืดหยุ่น (MPa)**
อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	69×10^3
เหล็กหล่อ	138×10^3
ทองแดงและทองแดงผสม	110×10^3
เหล็ก	209×10^3
ตะกั่ว	21×10^3
แมกนีเซียม	48×10^3
นิกเกิล	209×10^3
เหล็กกล้า	209×10^3

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้นความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดๆหนึ่ง ในช่วงนี้ที่จะกราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุค (Hook's Law) คือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เรียกว่าจุดพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) คือเมื่อปล่อยแรง

กระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงกราฟ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆหนึ่งนั้น เรียกว่าจุดพิกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) กับวัสดุนั้นแต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร(Plastic Deformation) และจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ที่จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่านี้มีประโยชน์กับวิศวกรมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ในวัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.20% แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นโค้งของกราฟค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ดังรูปที่ 2.14 ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิดและความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด แสดงไว้ดังตารางที่ 2.9 ถึง 2.10

ตารางที่ 2.10 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [18]

โลหะ	**ความแข็งแรงคราก (MPa)**	**ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)**
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

โดยทั่วไป ในการทดสอบความแข็งแรงดึง รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รูร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่บริเวณพื้นที่ที่ห่างจากความไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.15 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีรูความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดังที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาค่าได้ โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress concentra-tion factor: K_t) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดกับค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน

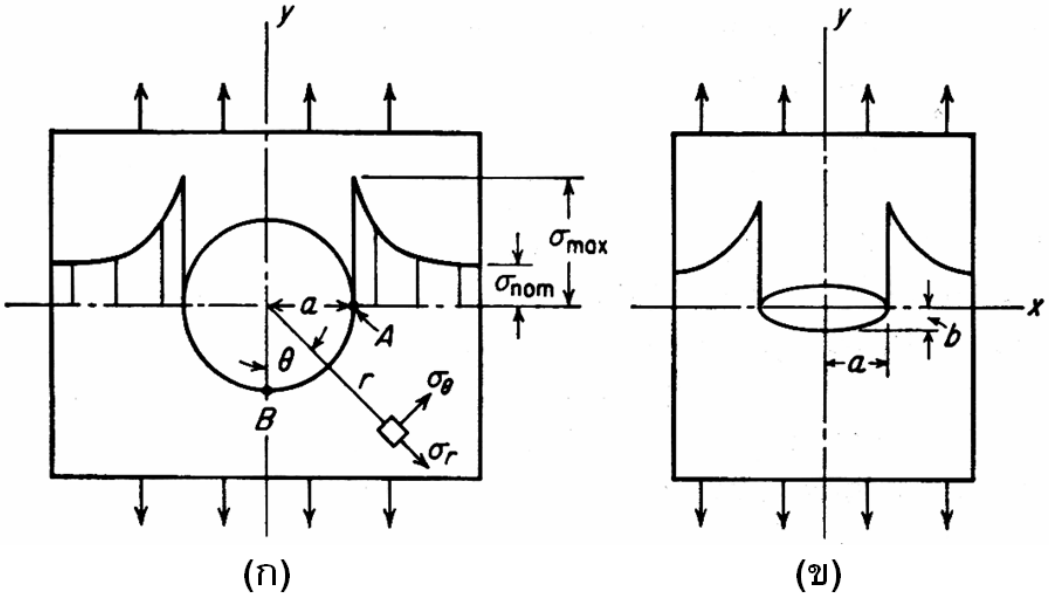
ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้น งานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิว และค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 2.16

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nominal}} \tag{2.6}$$

เมื่อ K_t = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี

σ_{max} = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง

$\sigma_{nominal}$ = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง

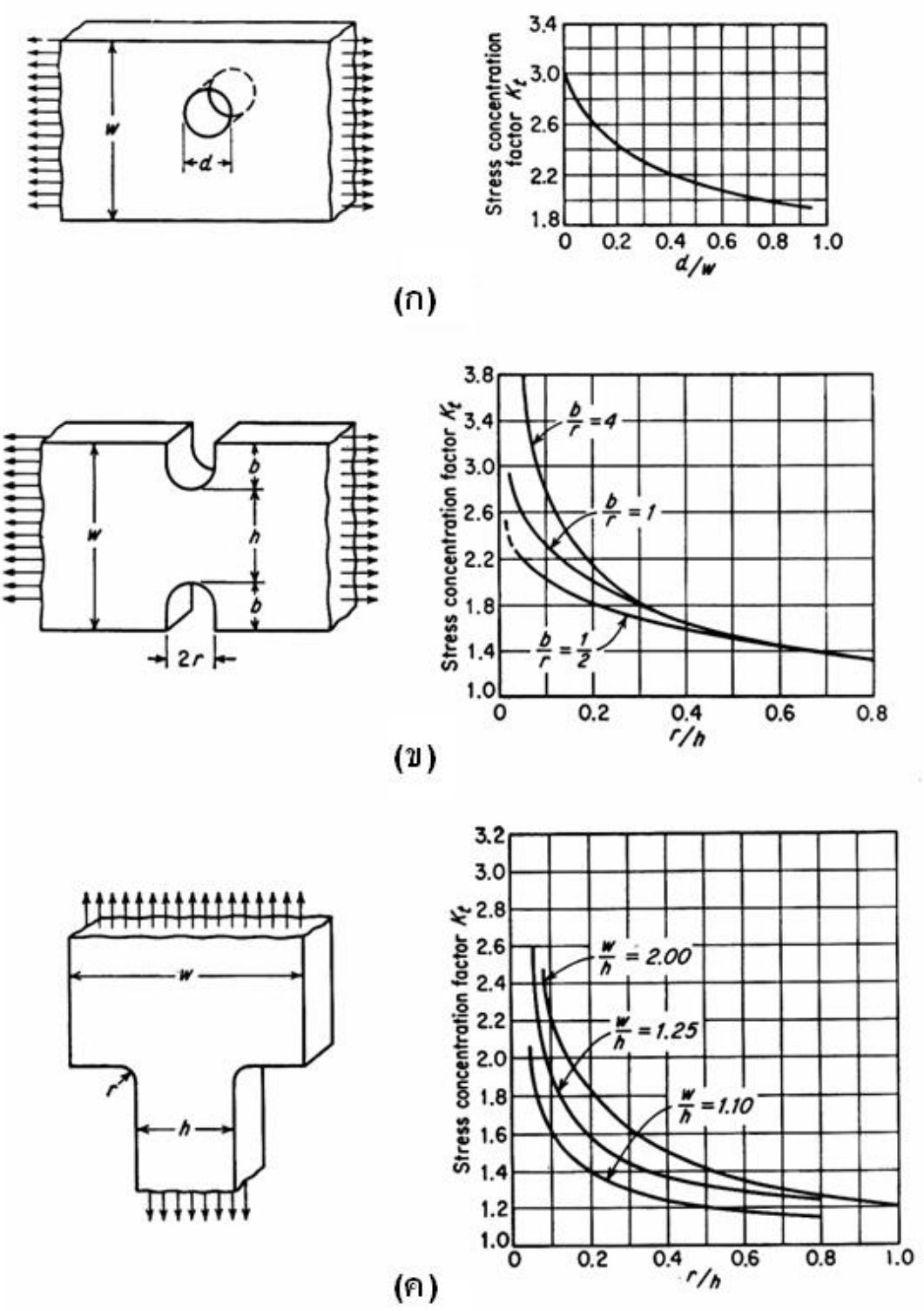


รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [20]

2.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบแบบมหภาค โดยมีจุดประสงค์ ดังนี้ คือ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สแลกฝังในการซึมลึกของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณา

รอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [26]

ก. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

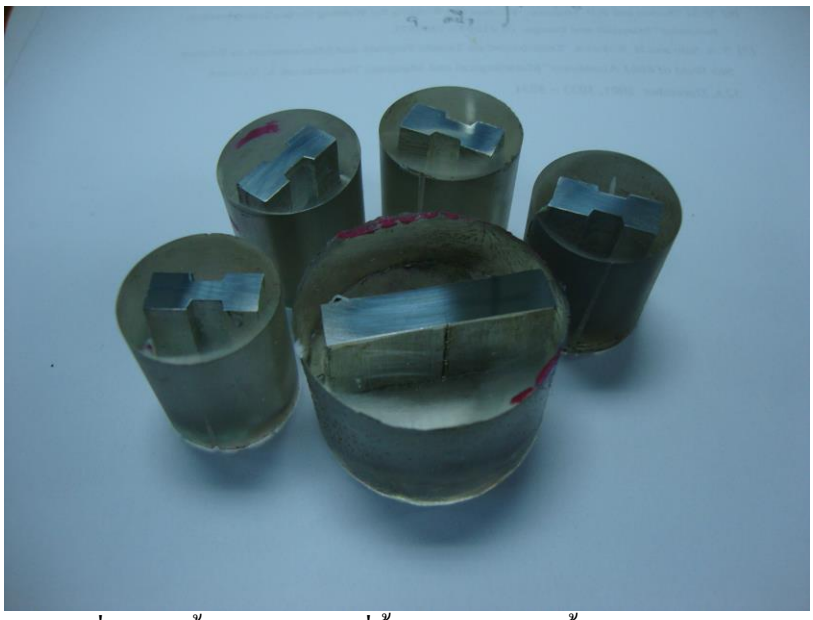
ตัดชิ้นงานตามขวางออกเป็นชิ้นประมาณ 4 – 5 ชิ้น ห่างจากขอบงานประมาณ 1 นิ้ว ของปลายทั้งสองข้าง ข้อควรระวัง คือ การตัดชิ้นงานต้องพยายามมิให้เกิดความร้อน หรือ ใช้แรงกดระหว่างการตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปได้

ข. การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ

ในการตัดผิวชิ้นงานต้องมีขนาดที่เหมาะสม ภาคตัดขวางจะอยู่บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ ในการจัดเตรียมนั้นจะต้องไม่ทำงานให้เกิดความร้อนที่จะทำให้ โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นทำการปรับแต่งผิวให้เรียบด้วยการกลึงหรือทำการเจียระไนที่ผิวของชิ้นงาน และถ้างานมีขนาดเล็กยากแก่การจับในการเตรียมผิวชิ้นงานนั้น จะต้องทำการขึ้นตัวเรือน (Mounting) คือการฝังชิ้นงานลงในเรซิ่นโดยมีจุดประสงค์ เพื่อทำให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดที่พอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนทำการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยมคม และมุมแหลมของชิ้นงานอยู่เสมอ ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.17 จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทราย ซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 600 800 1000 1200 ตามลำดับ โดยการขัดน้ำ (การขัดต้องวางกระดาษทรายบนแผ่นที่เรียบ เช่น กระจกหนา เพื่อให้ได้ระนาบเดียวกัน) จนรอยกระดาษทรายมีทิศทางเดียวกันตลอดชิ้นทดสอบ แล้วหมุนชิ้นทดสอบทำมุม 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไปแล้วเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ที่ละเอียดขึ้นไปจนกระทั่งถึงเบอร์ 1200 การตรวจสอบและผลการตรวจสอบ อาศัยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) ตามมาตรฐาน ASME Section V โดยตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรืออุปกรณ์กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า แล้วบันทึกผลที่ปรากฏ โดยการถ่ายรูป หรือสเก็ตภาพ

ค. การกัดกรด

การทดสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะนั้น ในแต่ละชนิดจะต้องมีความแตกต่างกันในการใช้กรด เนื่องด้วยโลหะมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาต่อกรดจึงมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรดให้เหมาะสมกับโลหะงานนั้นๆ สำหรับที่ทำการทดสอบโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม การใช้กรดกัดจะต้องมีผสมของ น้ำกลั่น และกรดชนิดต่างๆที่ประกอบด้วยชนิด กรดไฮโดรฟูริก(HF) กรดไฮโดรครอริก กรดไนตริก และเมื่อทำการกัดกรดจนมองเห็นโครงสร้างตามต้องการในเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานล้างกรดออกด้วยน้ำที่สะอาด และเช็ดด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน



ภาพที่ 2.10 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นเรือนด้วยสารขึ้นเรือนชนิดต่าง ๆ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Lee *et al.* [5] รายงานว่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียมหล่อ A356 มีค่าเพิ่มเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลิกอนเกิดการตกผลึกในสารละลายอลูมิเนียมและทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งของสารละลาย (Solid Solution Hardening) ค่าความแข็งแรงแรงดึงของรอยต่อมีค่าสูงสุดมากกว่าค่าความแข็งแรงของอลูมิเนียม 20%

2.4.2 Ericson and Sandstrom [16] พบว่าค่าความแข็งแรงต่อความล้าของรอยต่อชนอลูมิเนียม A6082 มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินแนวเชื่อมโดยในรายงานไม่ได้ระบุถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยการอาร์คด้วยลวดทังสะเตน (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) หรือการเชื่อมทิก (Metal Inert Gas: TIG) แล้ว รอยเชื่อม FSW มีค่าความต้านทานความล้ามากกว่า

2.4.3 Li *et al*. [18] แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 2017-T351 ลดลงเมื่อระยะห่างการเคลื่อนที่ (Revolution Pitch or Welding Speed/Rotating Speed) มีค่าเพิ่มขึ้นและพื้นที่รอบๆการเกิดการกวนของวัสดุ คือพื้นที่ที่มีความแข็งต่ำสุดและเป็นตำแหน่งที่เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบ จากตัวอย่างทั้ง 3 งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของรอยต่อของอลูมิเนียม